

## Bi-S 쾌삭강의 칩생성특성

이영문\*, 조삼규\*\*, 장은실\*\*\*, 태원의\*\*\*, 심보경\*\*\*

### Chip Forming Characteristics of Bi-S Free Machining Steel

Y. M. Lee\*, S. K. Cho\*\*, E. S. Jang\*\*\*, W. I. Tae\*\*\*, B. K. Shim\*\*\*

#### Abstract

In this study, the characteristics of chip formation of the cold drawn Bi-S free machining steels were assessed. And for comparison, those of the cold drawn Pb-S free machining steel, the hot rolled low carbon steel which has MnS as free machining inclusions and the conventional steels were also investigated. During chip formation, the cold drawn free machining steels show relatively little change in thickness and width of chip compare to those of the conventional carbon steels. And a single parameter which indicates the degree of deformation during chip formation, 'chip cross-section area ratio' is introduced. The chip cross-section area ratio is defined as chip cross-section area is divided by undeformed chip cross-section area. The variational patterns of the chip cross-section area ratio of the materials cut are similar to those of the shear strain values. The shear stress, however, seems to be dependent on the carbon content of the materials.

The cold drawn Bi-S and Pb-S steels show nearly the same chip forming behaviors and the energy consumed during chip formation is almost same. A low carbon steel without free machining aids shows poor chip breakability due to its high ductility.

By introducing a small amount of free machining inclusions such as MnS, Bi, Pb or merely increasing carbon content the chip breakability improves significantly.

**Key Words :** Free machining steel(쾌삭강), Chip cross-section area ratio(칩단면적비), Specific cutting energy(비절삭에너지), Chip breaking index(칩절단지수)

## 1. 서론

기계적 성질을 저하시키지 않고 절삭성능을 향상시키기 위하여 개발된 쾌삭강은 일반적으로 저탄소강에 비금속성 또는 금속성 개재물을 개재시켜 절삭성을 향상시킨 것

이다. 비금속 개재물 중 대표적인 것이 MnS이고, 금속성 개재물은 강중에 고용도가 거의 없는 Pb, Bi 등의 저용점 금속들이다. 쾌삭강은 절삭시 공구의 마모율과 절삭력을 감소시키며 칩의 절단성 및 피삭재의 표면조도의 향상이 이루어진다고 보고되고 있다.<sup>1)</sup>

\* 경북대학교 기계공학부  
\*\* 포항제철 기술연구소  
\*\*\* 경북대학교 대학원 기계공학과

미국의 병기, 기계산업의 요구에 의해 1920년 S패삭강이 Inland Steel사에서 개발된 이래 1939년 Inland Steel사와 백텔 메모리알 연구소의 공동연구에 의해 Pb패삭강, 1960년 독일 아헨공대에서 Ca패삭강, 1961년 Inland Steel사에서 Te패삭강, 1980년대 중반 Inland Steel사와 일본 Nippon Steel사 공동으로 Pb-Bi계 패삭강이 개발되었으며, Inland Steel사에서는 Bi-S 패삭강을 상용화하였다.<sup>12)</sup>

한편 국내에서의 패삭강 개발현황은 80년대 중반 창원 특수강, 포항제철에서 S패삭강의 개발이 이루어졌으며, 국내 수요의 증가와 더불어 전량수입에 의존하던 패삭강을 대체하기 위하여 최근 포항제철 기술연구소에서 Bi-S계 패삭강의 개발이 진행되고 있다.<sup>13)</sup>

현재 패삭강으로서는 Pb-S계가 널리 사용되고 있으나 최근 Pb의 유독성 등 환경문제로 Pb를 Bi로 대체한 Bi-S계가 주목을 받고 있다.

본 연구에서는 최근 국내에서 개발된 냉간인발 Bi-S 패삭강의 절삭시 칩 생성 및 절단특성을 평가하였다. 또한 비교 평가를 위하여 일본에서 제조된 냉간인발 Pb-S계 패삭강과 국내에서 제조된 기계구조용강에 대한 절삭 실험을 병행하였다.

## 2. 피삭재

실험에 사용된 피삭재는 화학성분 및 단면 감소율을 달리하는 2종류의 냉간인발 Bi-S 패삭강(CDBi-S I 및 CDBi-S II), 일본에서 제조된 냉간인발 Pb-S 패삭강(CDPb-S)과 열간압연에 의해 제조된 기계구조용 SM10C, SM45C 및 Bi-S 패삭강을 만들기 위한 소재로서 Bi가 첨가되지 않은 열간압연된 HR10C이었다. Table 1에는 성분분석기(SPECTRO, LIPS)로 분석한 이들 강들의 화학적 조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions(wt%) of workpiece materials

	C	Si	Mn	P	S	Bi	Pb	Remark
CDBi-S I	0.075	0.046	1.33	0.077	0.296	0.12	-	*ROA 17%
CDBi-S II	0.055	0.032	1.38	0.09	0.291	0.12	-	*ROA 23%
CDPb-S	0.08	0.04	1.11	0.079	0.303	-	0.28	-
SM10C	0.102	0.222	0.706	-	0.002	-	-	-
SM45C	0.427	0.218	0.679	0.011	0.010	-	-	-
HR10C	0.098	0.007	1.28	0.105	0.310	-	-	-

\* ROA : Reduction of area

Table 2 Mechanical properties of workpiece materials

	Stress at ultimate (MPa)	Stress at offset yield (MPa)	Maximum strain	Hardness, HB
CDBi-S I	504	246	0.1894	170
CDBi-S II	529	247	0.1872	183
CDPb-S	547	260	0.2166	179
SM10C	355	197	0.4642	95.9
SM45C	665	266	0.381	197
HR10C	429	256	0.4551	116

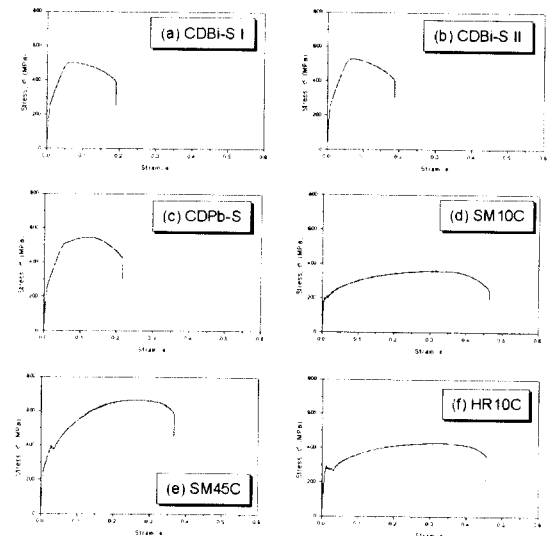


Fig. 1 Stress and strain diagram

또한 피삭재의 기계적 성질이 절삭 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 인장시험(Instron 8516)을 통하여 항복응력, 최대인장강도 및 연신률을 구하였으며, 또한 브리넬 경도시험(Tinius Olsen T/M Co. LTD., Brinelle hardness tester)을 통해 경도값을 구하였다. Table 2에는 인장 시험 및 경도시험 결과를 나타내었다.

Fig. 1은 인장 시험에서 얻어진 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 냉간인발된 패삭강과 열간압연된 강재들의 응력-변형률 선도는 매우 다른 형태의 변화를 보이고 있다. 냉간인발된 패삭강의 경우 항복점에서 최대인장강도까지의 응력 변화는 상당히 급격하게 일어나고 있으며, 비슷한 수준의 탄소함유량을 포함한 SM10C보다 최대인장강도는 증가하였으며 최대 변형률은 감소하였다. SM45C는 다른 열간압연된 강재와

비슷한 형태의 응력-변형률 특성을 나타내고 있으나 탄소 함유량이 많기 때문에 상대적으로 높은 최대인장강도값을 나타내고있다.

### 3. 절삭실험

냉간인발 Bi-S쾌삭강의 절삭특성을 평가하기 위하여 선반에서 외경선삭실험을 행하였다.

절삭공구로서는 홈형 칩포머(groove type chip former)가 성형되어 있는 국내T사의 CNMG120408 -KT350인서트를 사용하였으며, 공구홀더로는 PCLN R2525M12를 사용하였다.

절삭실험조건으로는 절삭속도 100m/min에서 절삭깊이를 2mm로 하였으며 이송은 0.067, 0.148, 0.234, 0.296, 0.345, 0.444 및 0.542mm/rev의 7단계로 하였다.

절삭력성분을 구하기 위하여 공구동력계(Kistler, 9257A)에서 나오는 절삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 데이터레코드에 저장하는 동시에 A/D변환기를 사용하여 PC에서 신호분석기능을 갖고있는 소프트웨어 패키지(Global Lab)를 사용하여 분석하였다.

각 절삭조건에서의 칩 생성 및 절단특성을 평가하기 위하여 칩을 수거하여 칩의 두께, 폭 및 무게를 측정하였다.

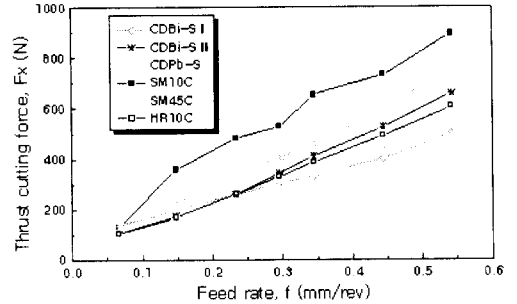
## 4. 실험결과 및 고찰

### 4. 1 절삭특성

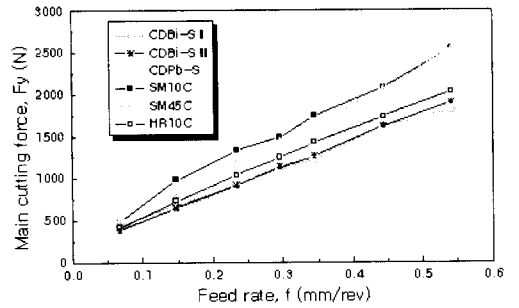
Fig. 2는 절삭실험에서 얻어진 절삭 3분력을 이송에 따라 나타낸 것이다. 절삭력성분은 이송이 증가함에 따라 비례하여 증가하며, 쾌삭강 계열이 기계구조용강 계열보다 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 2와 Table 2에서 보는 바와 같이 SM10C는 기계적 강도가 상당히 낮음에도 불구하고 다른 강에 비해 절삭력 성분이 크게 나타난다. 특히 배분력, 이송분력이 크게 나타난다. 이는 절삭시 칩생성특성이 다르기 때문이다.<sup>(4)</sup>

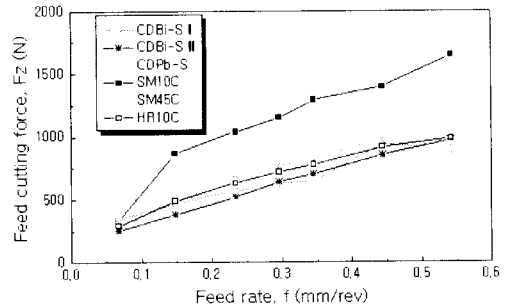
Fig. 3은 칩두께를 이송에 따라 나타낸 것이다. 칩의 두께는 이송이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 본질적으로 2차원절삭에서의 절삭깊이가 3차원절삭에서는 이송에 해당되기 때문이다. 동일한 이송조건에서 SM10C의 칩두께가 가장 두꺼우며, 그 다음으로 HR10C였으며, 나머지 강들은 비교적 비슷한 수준의 낮은 값을 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 (a) Thrust force,  $F_x$  vs. feed rate,  $f$   
(b) Main force,  $F_y$  vs. feed rate,  $f$   
(c) Feed force,  $F_z$  vs. feed rate,  $f$

Fig. 4는 측정된 칩의 폭을 나타낸 것으로 이송이 증가함에 따라 칩의 폭은 커지고 있다. 이는 이송이 증가함에 따라 칩의 두께가 두꺼워지며 칩 폭에 대한 칩 두께의 비가 커지게 된다. 이에 따라 평면변형을 변형상태에서 평면응력 변형상태로 이행하기 때문으로 판단된다. SM10C의 칩폭이 가장 큰 값을 나타내며, 냉간 인발된 쾌삭강들은 칩의 폭이 비교적 작다.

본 연구에서는 칩 생성시의 변형정도를 나타내기 위하

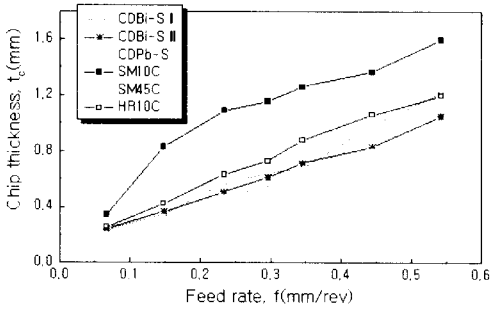


Fig. 3 Chip thickness,  $t_c$

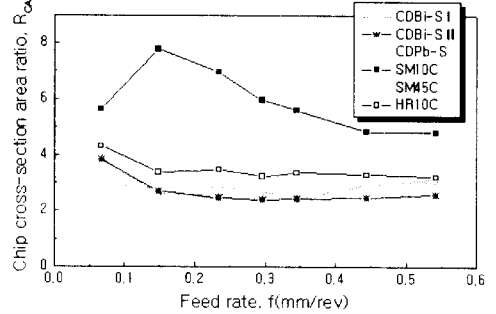


Fig. 6 Chip cross-section area ratio,  $R_{CA}$

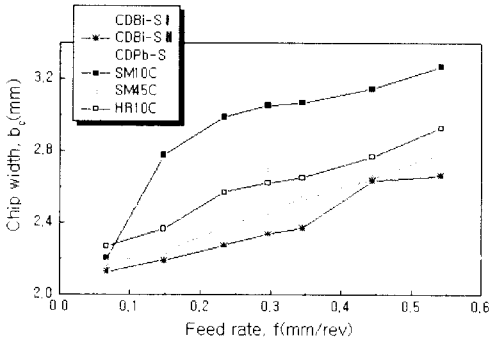


Fig. 4 Chip width,  $b_c$

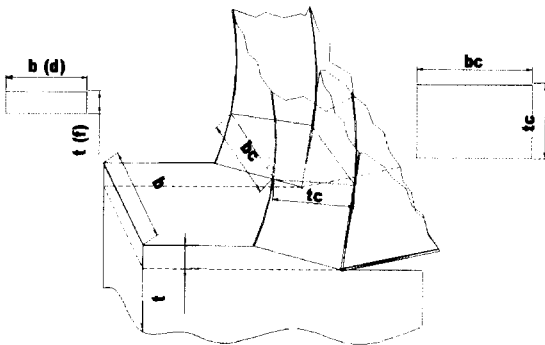


Fig. 5 Size of cut( $d \times f$ ) and chip cross-section area( $b_c \times t_c$ )

여 Fig. 5에서 보는 바와 같이 생성된 칩의 단면적( $b_c \times t_c$ )을 칩이 생성되기 전의 단면적, 즉 절삭의 크기(Size of cut,  $d \times f$ )로 나눈 값을 칩단면적비(Chip cross-section area ratio),  $R_{CA}$ 로 정의하였다.

Fig. 6은 칩단면적비를 이송에 따라 나타낸 것으로 이

값이 클수록 칩의 생성시 변형이 크다는 것을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 SM10C의 경우 매우 큰 값을 나타내며, HR10C의 경우 냉간 인발 쾌삭강 및 SM45C에 비해 약간 큰 값을 나타내고 있다.

Fig. 7은 피삭재의 SEM 조직사진과 전자선 미세 분석기(JEOL, JXA8600)를 이용하여 개재물을 분석한 사진을 나타낸 것이다. Fig. 7 (a)의 SM10C의 경우 대부분이 ferrite 조직이며 약간의 pearlite 조직을 포함하고 있으며 경도 값이 95.9H<sub>B</sub>로 매우 연한조직이다. SM10C의 경우 Fig. 6에서 본 바와 같이 칩단면적비가 크게 나타난 것은 이러한 낮은 경도에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 7 (b)의 SM45C의 경우는 경한 조직인 pearlite가 60%이상을 차지하고 있어서 칩 생성시 칩의 변형이 적게 일어나 칩 생성특성이 향상되었으리라 판단된다.

Fig. 7(c)의 HR10C(c-①)의 경우 SM10C와 비슷한 수준의 탄소를 함유하고 있으나, 쾌삭강과 비슷한 양의 Mn(c-②)과 S(c-③)를 함유하고 있어서 그림에서 보는 바와 같이 쾌삭개재물 MnS를 형성하고 있다. HR10C의 경우 이런 쾌삭개재물 MnS의 효과로 칩생성특성이 향상되었다고 판단된다. Fig. 7(d)와 (e)에서 보는 바와 같이 냉간인발된 쾌삭강들은 쾌삭개재물 MnS가 상당량 존재하고 있으며 MnS 주위에 Bi 또는 Pb가 흡착되어 있다. 냉간인발 쾌삭강의 경우 이런 개재물들의 효과로 칩생성특성이 향상되었으리라 판단된다.

## 4. 2 절삭성능

절삭실험에서 얻어진 칩두께와 절삭3분력의 측정결과를 이영문<sup>15)</sup>등에 의해 개발된 3차원 외경선삭해석 소프트웨어 패키지에 입력하여 피삭재의 전단변형율과 전단력 및 비절삭에너지를 구하였다.

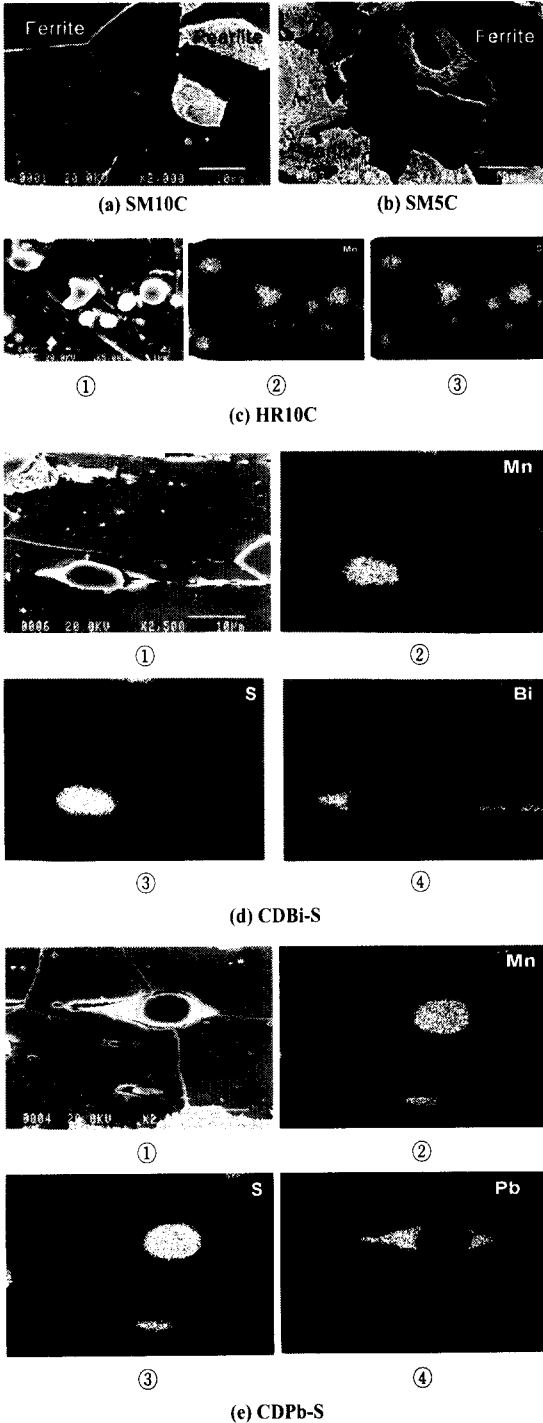


Fig. 7 SEM microphotograph and EPMA results of work-piece materials.

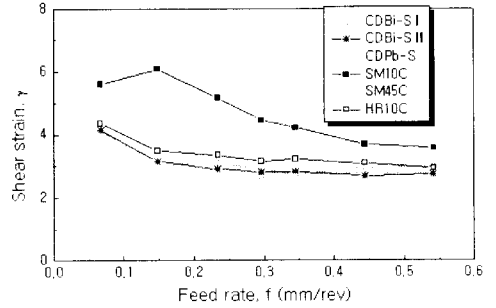


Fig. 8 Shear strain,  $\gamma$

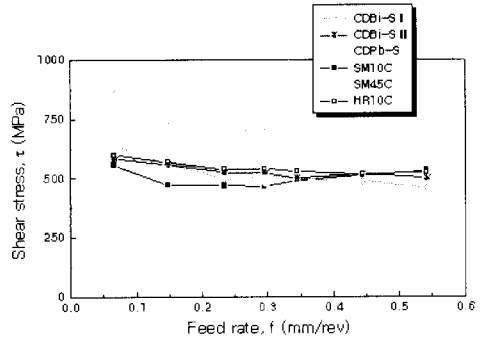


Fig. 9 Shear stress,  $\tau$ (N/mm<sup>2</sup>)

Fig. 8은 전단 변형률,  $\gamma$  를 나타낸 것으로 Fig. 6의 칩단 면적비와 비슷한 경향을 나타냈다. SM10C가 상당히 높은 값을 나타내며 쾌삭강 및 SM45C가 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 9는 전단응력,  $\tau$  를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 SM45C가 가장 높은 전단응력을 나타내고 있다. 이는 다른 소재에 비해 탄소함유량이 많고, 기계적 강도가 크기 때문이다.

SM10C는 탄소함유량이 낮기 때문에 낮은 전단응력을 나타내는 반면 연성이 크기 때문에 변형이 많이 일어나 전단변형률이 높은 값을 나타내며, 반면 HR10C는 MnS가 쾌삭 첨가물과 같은 효과를 나타내 상대적으로 전단변형률이 작아진다고 생각된다. 쾌삭강의 경우 탄소 함유량이 낮아 전단응력은 낮으며, 쾌삭 첨가물에 의해 전단변형률이 적고 칩의 변형도 작아진다고 판단된다.

비절삭에너지,  $u$ 는 절삭입력조건에 따른 절삭특성평가를 위해서 가장 일반적으로 채택되는 파라미터이다.<sup>(6)</sup> Fig. 10은 비절삭에너지를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 비절삭에너지는 이송이 증가함에 따라 감소하

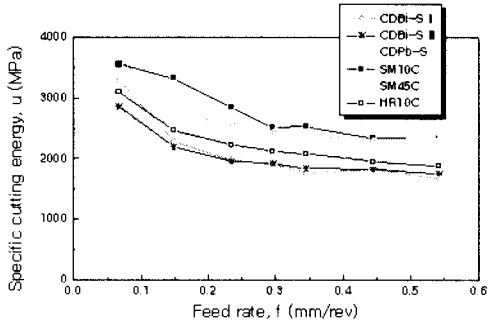


Fig. 10 Specific cutting energy,  $u$

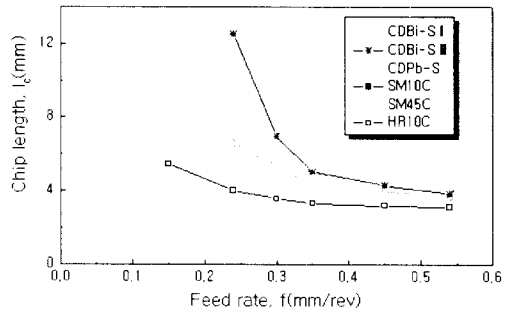


Fig. 11 Chip length,  $l_c$

는 경향을 나타내고 있다. 이러한 실험결과는 절삭에서의 치수효과를 나타내는 것이다.<sup>(7)</sup>

비절삭에너지는 기계구조용강이 높은 값을 나타내고 있으며 Pb-S패삭강이 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

SM10C의 경우 낮은 전단응력에도 불구하고 비절삭에너지가 큰 이유는 상대적으로 전단변형에 소모되는 에너지가 크기 때문이며, SM45C의 경우 고탄소강으로써 전단변형률은 작으나 전단응력이 크기 때문에 비절삭에너지가 크게 나타난다.

### 4. 3 칩절단특성

이송이 커짐에 따라 칩은 연속형에서 불연속형(절단)칩으로 생성되며 칩이 절단되는 주기도 짧아지는 경향을 나타낸다.

Fig. 11은 절단칩이 생성된 경우 이송에 따른 칩길이의 변화를 나타낸 것이다.

$$l_c = \frac{w_c}{\rho_c t_c b_c} \quad (2)$$

여기서,  $l_c$ 는 절단된 칩의 길이(mm),  $w_c$ 는 절단된 칩의 무게(g),  $\rho_c$ 는 칩의 밀도( $g/mm^3$ ),  $t_c$ 는 칩의 두께(mm),  $b_c$ 는 칩의 폭(mm)이다. 절단칩의 길이는 이송이 증가함에 따라 급격히 감소하다가 일정해지는 경향을 나타낸다. SM10C의 경우 전 절삭조건에서 연속형칩이 생성되었다. 한편 HR10C는 칩의 길이가 가장 짧게 절단되는데 이는 식 (3)<sup>(8)</sup>에 나타난 바와 같이 칩이 상대적으로 두껍게 생성되어 칩표면의 변형률이 크기 때문이다.

$$\varepsilon = \frac{t_c}{2} \left( \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_l} \right) \quad (3)$$

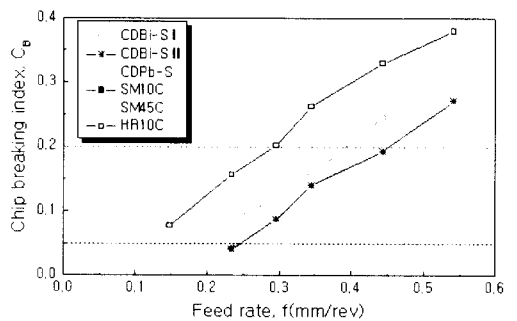


Fig. 12 Chip breaking index,  $C_B$

여기서,  $\varepsilon$ 는 칩표면 변형률,  $t_c$ 는 칩두께,  $R_o$ 는 절단이 이루어지기 전의 칩의 굴곡반경,  $R_l$ 는 절단이 이루어진 후의 칩의 굴곡반경이다.

Fig. 12는 절삭실험에서 생성된 절단칩의 칩 절단지수,  $C_B$ 를 이송에 대해 나타낸 것이다.<sup>(9)</sup>

$$C_B = \frac{t_c}{l_c} \quad (4)$$

식(4)에서 보는 바와 같이 칩절단지수,  $C_B$ 는 측정 용이한 절단칩 두께,  $t_c$ 와 길이,  $l_c$ 에 의해 결정되는 무차원 파라미터이다.

Fig. 12에서 보는 것과 같이 각각의 피삭재 모두 칩절단지수,  $C_B$ 의 값은 이송의 증가와 더불어 대략 직선적으로 증가한다. 선행 연구<sup>(8)</sup>에서 칩절단지수값이 0.05-0.2 영역에서 적정제어된 칩이 발생하며, 0.2이상에서는 과잉제어된 칩이 발생하고 0.05이하에서는 과소제어된 칩이 발생하였다. 본 연구에서도 동일한 결과를 나타내었다.

SM10C의 경우 전 절삭조건에서 연속형 칩이 생성되어

칩절단지수 값은 구할 수 없었으며, HR10C의 경우 다른 피삭재에 비해 높은 칩절단지수값을 나타내고 있다. 이는 동일이송에서 생성된 절단칩의 두께가 상대적으로 두껍고 칩의 길이가 짧기 때문이다. CDBi-S I의 경우는 CDBi-S II 및 CDPb-S에 비해 칩절단지수값이 높게 나타난다. 이는 Fig. 3 및 11에서 보는 바와 같이 CD Bi-S I이 나머지 두 쾌삭강에 비해 미미하지만 칩이 두껍고 상대적으로 짧기 때문이다. CDBi-S II, CDPb-S 및 SM45C가 상대적으로 넓은 이송범위에서 적정제어된 칩이 많이 발생하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 최근 국내에서 개발된 냉간인발 Bi-S 쾌삭강, 일본에서 제조된 냉간인발 Pb-S 쾌삭강, 쾌삭강의 소재로 개발된 열간압연강 HR10C, 기계구조용강 SM10C 및 SM45C의 칩생성특성을 비교평가하기 위한 파라미터로 칩단면적비를 도입하였다.

- (1) 냉간인발쾌삭강들의 칩단면적비는 저탄소강인 SM10C에 비해 상당히 낮은 수준의 값을 나타내고 있다.
- (2) 비절삭에너지의 경우 냉간인발 Pb-S 쾌삭강이 가장 낮은 수준이었으며 Bi-S 쾌삭강도 비슷한 수준의 낮은 값을 나타내었다.
- (3) 냉간인발된 Pb-S 쾌삭강과 SM45C가 적정제어된 칩이 상대적으로 많이 생성되어 우수한 칩절단특성을 나타내었으며, CDBi-S II도 이들과 비슷한 수준의 칩절단특성을 보이고 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) 中村貞行, "特殊快削鋼の製造と製品特性", 西山記念技術講座, 日本鐵鋼協會, pp. 181~215, 1984.
- (2) D. Bhattacharya, "Machinability of Steel", J. of Metals, Vol. 39, No. 3, pp. 32~35, 1987.
- (3) 조삼규, "Bi-S계 쾌삭강의 고온연성에 대한 열간 압연 및 Bi의 영향", 대한금속학회지, 제34권, 제7호, pp. 822~829, 1996.
- (4) E. M. TRENT, "Metal Cutting", Butterworth & Co. Ltd., p. 42, 1977.
- (5) 이영문, 최원식, 송태성, 박태준, 장은실, "3차원 절삭시 칩 공구 마찰 및 전단 특성 해석", 한국정밀공학회지, 제16권, 6호, pp. 190~196, 1999.
- (6) M. C. Shaw and I. Finnie, "The Shear Stress in Metal Cutting", Trans of the ASME, Vol. 77, pp. 115~125, 1955.
- (7) I. S. Jawahir N. Qureshi and J. A. Ares cularatne, "On the Interrelationships of some Machinability Parameters in Finish Turning with Cermet Chip Forming Tool Inserts", Int. J. Mach Tools Manufact. Vol. 32, No. 5, pp. 709~723, 1992.
- (8) K. Nakayama, "A Study of the Chip Bre aker" Trans of the JSME, Vol. 5, No. 17, pp. 142~150, 1962.
- (9) 이영문, 최원식, 장승일, 허인호, "칩절단지수에 의한 칩절단특성 평가", 대한기계학회논문집, A권, 제22권, 제11호, pp. 1989~1997, 1998.